

LUO Jia. A Crossover Approach to Calculate the Time-variable of the Earth Gravity Field Low Degree Zonal Harmonic Terms Based on LEO Cluster[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(5):703-708. (罗佳. 利用 LEO 星群反演地球重力场低阶带谐项变化的交叠点法[J]. 测绘学报, 2012, 41(5):703-708.)

## 利用 LEO 星群反演地球重力场低阶带谐项变化的交叠点法\*

罗 佳<sup>1,2</sup>

1. 武汉大学 地球空间环境与大地测量教育部重点实验室, 湖北 武汉 430079; 2. 武汉大学 测绘学院, 湖北 武汉 430079

### A Crossover Approach to Calculate the Time-variable of the Earth Gravity Field Low Degree Zonal Harmonic Terms Based on LEO Cluster

LUO Jia<sup>1,2</sup>

1. Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract : A crossover point approach was studied for low-cost LEO cluster precise orbit data to recover the global time-variable information without accelerometer system (ACC) or K-band ranging system (KBR) measurements. This approach can reduce the non-gravitational force effects on LEO, obviously. Data coverage and the orbit radial error effect on this approach was analyzed based on COSMIC (constellation observing system for meteorology ionosphere & climate) satellites data. And then, the the low degree zonal harmonic terms,  $C_2^0$  and  $C_3^0$ , simulation results of the approach were given.

Key words : LEO cluster; earth gravity field; crossover approach

摘 要: 新一代重力卫星计划主要依靠高精度星载加速度计(ACC)、星间测距系统(KBR)或星载梯度计(SGG)进行地球重力场探测。搭载高精度星载 GPS 接收机的低轨卫星(low earth orbit, LEO)可以相对较低成本获取 LEO 卫星的精密轨道。卫星精密轨道一方面服务于 LEO 的主任务(如遥感、气象等);另一方面可以将这类 LEO 卫星和星座综合起来,构成 LEO 星群 LEO 星群精密轨道数据包含的丰富地球重力场信息为获取地球重力场的时变信息提供可能。本文给出一种利用 LEO 星群精密轨道数据反演地球重力场低阶带谐系数时变信息的实用方法——交叠点法,该方法可有效削弱非保守力等因素对重力场反演的影响。然后,以 COSMIC (constellation observing system for meteorology ionosphere & climate)为实例分析 LEO 星群交叠点的覆盖特性,径向轨道精度对交叠点法的影响。最后进行低阶带谐系数( $C_2^0$  和  $C_3^0$ )时变信号的模拟计算,并对结果进行分析。

关键词: LEO 星群; 地球重力场; 交叠点法

中图分类号: P228

文献标识码: A

文章编号: 1001-1595(2012)05-0703-06

基金项目: 国家自然科学基金(41131067; 40804004; 40637034)

## 1 引言

基于 CHAMP (challenging minisatellite payload) 和 GRACE (gravity recovery and climate experiment) 卫星计划, 人类以前所未有的精度和分辨率获取了整体地球的重力场稳态及其随时间变化的中长波信息<sup>[1-3]</sup>。但因高精度重力卫星平台复杂度高, 星载加速度计(ACC), K 波段测距仪(KBR)等关键有效载荷制造、测试和安装十分困难等技术原因, 类似 CHAMP 和 GRACE 的重力卫星探测计划需要较长的研发周期且耗费高昂, 难以广泛实施。鉴于此, GRACE 卫星的任务期也由原计划的 5 年延至 10 年, 尽量缩短后续计划

和当前计划的空白期。另一方面, 多用途的低成本 LEO 卫星和星座迅速发展为相关行业提供了很好的卫星平台, 广泛应用于遥感、气象、空间探测等领域。这些 LEO 卫星和星座的共同特点是将高精度星载 GPS 接收机作为标准载荷进行 LEO 卫星平台精密轨道跟踪。2006-04-14 美国和中国台湾省联合研制的 COSMIC 卫星星座<sup>[2]</sup>在美国 Vandenberg 空军基地以“一箭六星”的方式成功发射。该卫星计划的空间部分由 6 颗倾角为  $71^\circ$ , 初始轨道高度为 400 km 的 COSMIC 卫星组成。卫星轨道在系统运行过程中逐步上升, 发射一年后稳定运行于 800 km 高度。每颗 COSMIC 卫星均搭载了 3 台主要有效载荷: GPS

\* 谨以此文祝贺宁津生院士 80 华诞

掩星(定轨)观测接收机、微型电离层成像仪和三波段信标发射机。其主要任务是通过对比掩星观测数据的处理,由CDAAC(COSMIC Data Analysis and Archive Center)和TACC(Taiwan Analysis Center for COSMIC)提供包括地表至40 km高度的湿度、温度、气压、各大气参数的垂直廓线以及上部大气层的电子密度信息的数据产品<sup>[4-6]</sup>。同时,该卫星计划为研究地球重力场提供了一种新的模式<sup>[7]</sup>。相对其他重力卫星系统,COSMIC在某些方面具有显著优势: COSMIC没有搭载制造和安装难度极高的星载加速度计和星载K波段测距系统,成本较低;卫星质量较轻(单颗<70 kg)可一箭多星发射;体积小外形相对简单易于大气阻力和光压摄动的精确模型化;卫星数多达6颗(CHAMP为1颗,GRACE为2颗),完成一次全球覆盖的时间短且覆盖密度更大。这些优点使其在获取全球时变重力场信息方面具有一定优势。而且伴随更多的LEO卫星和星座计划的发射,所构成的具有GPS定轨能力的LEO星群将以更高的空间分辨率和时间分辨率覆盖全球,并可以作为GRACE和其后续计划之间全球时变重力场探测数据间断期的补充。

目前LEO星群反演地球重力场的方法主要有经典的动力学法<sup>[8-10]</sup>,基于能量守恒原理的能量法<sup>[11]</sup>等。由于低成本LEO卫星未搭载加速度计,非保守力的模型化精度将直接影响重力场的反演精度,所以作者引入在重力网数据处理<sup>[12]</sup>和卫星测高数据处理<sup>[13-14]</sup>领域经常使用的“交叠点”概念,提出一种星-星对之间构成所谓的交叠点,针对交叠点处两弧段非保守力之差更易模型化,且精度更高的特点,在交叠点处直接计算加速度差,进而确定重力场时变信息的方法——“交叠点法”。文献<sup>[15]</sup>对交叠点法应用于低成本COSMIC星座地球重力场恢复的有效覆盖特性进行了分析<sup>[15]</sup>。分析结果表明低成本LEO星群可以较高的时间分辨率很好地覆盖全球区域,但是对卫星的定轨精度要求较高,需要1 cm级的定轨精度。在此基础上,本文开展利用交叠点法反演地球重力场低阶带谐项变化的研究,主要内容包括计算模型、数据的覆盖特性分析、LEO卫星的轨道精度分析和模拟数据计算验证。

## 2 计算低阶带谐项变化的交叠点法

本文交叠点的定义与卫星测高学相同。如

图1所示,LEO星群的任两颗卫星形成的降弧段(0号)和升弧段(1号)的交叠点。交叠点在0号弧段上的对应位置为A,对应时刻为 $t_0$ ,在1号弧段上的对应位置为B,对应时刻为 $t_1$ 。令A和B点处加速度分别为 $a_A$ 和 $a_B$ 。卫星飞越0弧段和1弧段的时间差即为所求重力场变化的时间跨度。因两卫星在飞跃交叠点位置时高度不一,极难正好重合,因此需要使用延拓的方法将其中一点归算到另一点。本文采用高精度的参考模型进行归算,如果归算到A点,则取A和B点处加速度模型值分别为 $a_A^m$ 和 $a_B^m$ ,假设

$$\left. \begin{aligned} a_B^0 - a_A^0 &= a_B^m - a_A^m \\ a_B^1 - a_A^1 &= a_B^m - a_A^m \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, $a_A^0$ 和 $a_B^0$ 为 $t_0$ 时刻A和B点的加速度值; $a_A^1$ 和 $a_B^1$ 为 $t_1$ 时刻A和B点的加速度值。则在A点处加速度的变化 $\Delta a_A$ 可以由公式(2)表达

$$\Delta a_A = a_A^1 - a_A^0 = (a_B^1 - a_B^m + a_A^m) - a_A^0 \quad (2)$$

式中, $\Delta a_A$ 即为交叠点法中的观测量,为了计算低阶带谐系数的变化,还需要给出 $\Delta a_A$ 和低阶带谐系数的微分关系式。

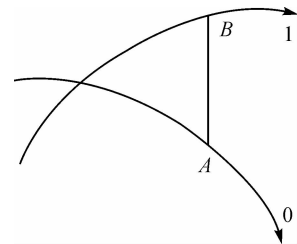


图1 交叠点示意图

Fig. 1 The sketch map of crossover

首先,直接给出地球重力场的引力位 $V$ 的表达式<sup>[16]</sup>

$$V(r, \phi, \lambda) = \frac{GM}{r} \left\{ 1 + \sum_{n=2}^{\infty} \left( \frac{a_e}{r} \right)^n P_n(\sin \phi) + \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=1}^n \left( \frac{a_e}{r} \right)^n (C_n^m \cos m\lambda + S_n^m \sin m\lambda) P_n^m(\sin \phi) \right\} \quad (3)$$

式中, $GM$ 为地心引力常数; $a_e$ 为地球赤道半径; $r$ 为计算点的地心距; $\lambda$ 和 $\phi$ 为地心经纬度; $C_m^m$ 和 $S_m^m$ 为Stokes系数; $P_n^m$ 为缔合勒让德函数。

加速度对带谐系数的偏导数可展开为

$$\frac{\partial \bar{a}}{\partial C_n^m} = \frac{\partial}{\partial C_n^m} \left( \frac{\partial V}{\partial r} \right) \frac{\partial r}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial C_n^m} \left( \frac{\partial V}{\partial \phi} \right) \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial C_n^m} \left( \frac{\partial V}{\partial \lambda} \right) \frac{\partial \lambda}{\partial r} \quad (4)$$

式中, $\frac{\partial r}{\partial r}$ 、 $\frac{\partial \phi}{\partial r}$ 和 $\frac{\partial \lambda}{\partial r}$ 可由下式计算

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial r}{\partial \mathbf{r}} &= \frac{\mathbf{r}^T}{r} \\ \frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{r}} &= \frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}} \left( -\frac{z\mathbf{r}^T}{r^2} + \frac{\partial z}{\partial \mathbf{r}} \right) \\ \frac{\partial \lambda}{\partial \mathbf{r}} &= \frac{1}{x^2+y^2} \left( x \frac{\partial y}{\partial \mathbf{r}} - y \frac{\partial x}{\partial \mathbf{r}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

另外,由公式(3)可推导  $\frac{\partial V}{\partial r}$ 、 $\frac{\partial V}{\partial \phi}$  和  $\frac{\partial V}{\partial \lambda}$  的表达式

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial r} &= -\frac{1}{r} \frac{GM}{r} \sum_{n=2}^N \left\{ \left( \frac{a_e}{r} \right)^n (n+1) \cdot \right. \\ &\quad \left. \sum_{m=0}^n [(C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin \phi)] \right\} \\ \frac{\partial V}{\partial \phi} &= \frac{GM}{r} \sum_{n=2}^N \left\{ \left( \frac{a_e}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n [(C_{nm} \cos m\lambda + \right. \\ &\quad S_{nm} \sin m\lambda) (P_{m+1}(\sin \phi) - \\ &\quad m \tan \phi P_m(\sin \phi))] \right\} \\ \frac{\partial V}{\partial \lambda} &= \frac{GM}{r} \sum_{n=2}^N \left\{ \left( \frac{a_e}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n m [(-C_{nm} \sin m\lambda + \right. \\ &\quad S_{nm} \cos m\lambda) P_{nm}(\sin \phi)] \right\} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

进而可以得出低阶带谱项偏导数  $\frac{\partial}{\partial C_n^m} \left( \frac{\partial V}{\partial r} \right)$ 、 $\frac{\partial}{\partial C_n^m} \left( \frac{\partial V}{\partial \phi} \right)$  和  $\frac{\partial}{\partial C_n^m} \left( \frac{\partial V}{\partial \lambda} \right)$ 。在此仅给出 2 和 3 阶带谱项的偏导数表达式

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial C_2^0} \left( \frac{\partial V}{\partial r} \right) &= -\frac{3}{r} \frac{GM}{r} \left( \frac{a_e}{r} \right)^2 P_2^0(\sin \phi) \\ \frac{\partial}{\partial C_2^0} \left( \frac{\partial V}{\partial \phi} \right) &= \frac{GM}{r} \left( \frac{a_e}{r} \right)^2 P_2^1(\sin \phi) \\ \frac{\partial}{\partial C_2^0} \left( \frac{\partial V}{\partial \lambda} \right) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial C_3^0} \left( \frac{\partial V}{\partial r} \right) &= -\frac{4}{r} \frac{GM}{r} \left( \frac{a_e}{r} \right)^3 P_3^0(\sin \phi) \\ \frac{\partial}{\partial C_3^0} \left( \frac{\partial V}{\partial \phi} \right) &= \frac{GM}{r} \left( \frac{a_e}{r} \right)^3 P_3^1(\sin \phi) \\ \frac{\partial}{\partial C_3^0} \left( \frac{\partial V}{\partial \lambda} \right) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

将表达式(5)、式(7)和式(8)代入式(4)即得到加速度对 2 和 3 阶带谱系数的偏导数公式。实用上,可利用交叠点的加速度差计算观测时刻间低阶带谱系数的随时间变化。

### 3 交叠点覆盖以及轨道精度分析

交叠点的覆盖特性和 LEO 的径向轨道精度是交叠点法反演地球重力场时变信息的关键因素。以下将分别就 LEO 星群交叠点的覆盖特性

和交叠点法对精密定轨精度的要求进行分析。

#### 3.1 交叠点覆盖分析

由于地球重力场具有全球性的特点,因此数据的有效覆盖是利用卫星技术反演地球重力场的关键之一。为了评价 LEO 星群构成交叠点的覆盖特性,以 COSMIC 星座为例,选取前后相距 30 d 的 10 对数据:2008.001-2008.010 和 2008.031-2008.040 依次构成日对进行分析。以 2008.001 和 2008.031 日对为例,交叠点的配对规则如表 1 所示。

表 1 交叠点配对规则

Tab. 1 The crossover match of COSMIC satellites					
2008.001 01 星	2008.001 02 星	2008.001 03 星	2008.001 04 星	2008.001 05 星	2008.001 06 星
2008.031 01 星					
2008.031 02 星	2008.031 02 星				
2008.031 03 星	2008.031 03 星	2008.031 03 星			
2008.031 04 星	2008.031 04 星	2008.031 04 星	2008.031 04 星		
2008.031 05 星	2008.031 05 星	2008.031 05 星	2008.031 05 星	2008.031 05 星	
2008.031 06 星	2008.031 06 星	2008.031 06 星	2008.031 06 星	2008.031 06 星	2008.031 06 星

通过配对后计算出 1 个日对和 10 个日对的 COSMIC 星座交叠点的覆盖情况如图 2 所示。

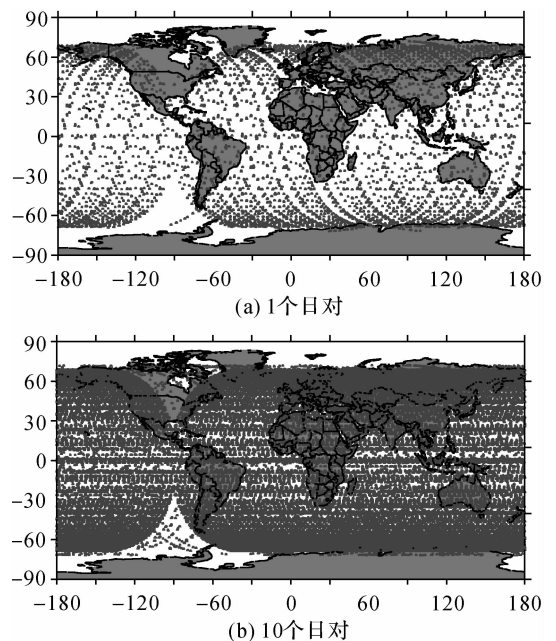


图 2 交叠点地面覆盖

Fig. 2 The coverage of crossover points

可以看出,1个日对的覆盖对于低阶位系数的计算已有足够的空间分辨率。而10个日对的覆盖可满足更高空间分辨率的要求。当然,由于COSMIC的主要任务是为气象服务的,并非为重力场探测专门设计,所以在一些区域交叠点的覆盖不够理想。这通过引入更多的LEO卫星和星座,形成真正的LEO星群来更好地满足覆盖的要求。

### 3.2 径向轨道精度分析

交叠点法的观测是LEO的精密轨道,其轨道精度,特别是径向轨道精度对反演的影响最大,而非保守力模型化误差反而不是最主要的误差源。

表2 径向轨道误差产生的重力场误差

Tab. 2 The gravity errors caused by orbital radial errors  
mGal

轨道高度/km	径向误差			
	0.01 m	0.05 m	0.10 m	0.15 m
800.00	$2.15 \times 10^{-3}$	$10.8 \times 10^{-3}$	$21.6 \times 10^{-3}$	$32.3 \times 10^{-3}$
700.00	$2.25 \times 10^{-3}$	$11.2 \times 10^{-3}$	$22.5 \times 10^{-3}$	$33.7 \times 10^{-3}$
600.00	$2.35 \times 10^{-3}$	$11.7 \times 10^{-3}$	$23.5 \times 10^{-3}$	$35.2 \times 10^{-3}$
500.00	$2.45 \times 10^{-3}$	$12.2 \times 10^{-3}$	$24.5 \times 10^{-3}$	$36.7 \times 10^{-3}$

表2给出了800~500 km,4种轨道高度,不同径向轨道误差(0.01~0.15 m)对重力场观测精度的影响。其中,0.01 m的精度在500 km高度的配置情况与GRACE类似,而0.15 m的精度在800 km高度的配置与COSMIC类似。为了直观地分析时变重力场的量级,使用美国喷气动力实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)公布的2008年1月—2008年2月GRACE Level2数据的单月重力场模型,分别计算了800 km和500 km轨道高度处,时变信号的大小如图3所示。在800 km轨道高度处,全球重力扰动变化量的绝对值之平均值为 $3.725 \times 10^{-4}$  mGal,最小值为 $-1.5 \times 10^{-3}$  mGal,最大值为 $3.5 \times 10^{-3}$  mGal。在500 km轨道高度处,全球重力扰动变化量的绝对值之平均值为 $6.354 \times 10^{-4}$  mGal,最小值为 $-3.3 \times 10^{-3}$  mGal,最大值为 $5.7 \times 10^{-3}$  mGal。而由表2可知在800 km轨道高处,径向轨道误差依次为1 cm、5 cm、10 cm和15 cm将依次产生 $2.15 \times 10^{-3}$  mGal、 $10.8 \times 10^{-3}$  mGal、 $21.6 \times 10^{-3}$  mGal和 $32.3 \times 10^{-3}$  mGal的误差。

综合表2和图2给出的信息可知,以目前COSMIC星座10~15 cm的轨道精度不能满足

较高空间分辨率时变重力场反演的需要。如果能够降低轨道高度或提高径向定轨精度将使COSMIC应用于较高分辨率的时变重力场研究。

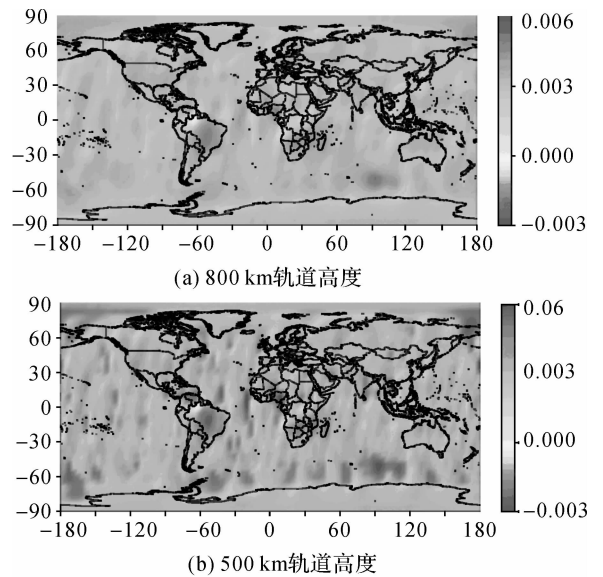


图3 2008-01—2008-02全球重力扰动的变化

Fig. 3 The time-variable gravity disturbances of 2008-01 to 2008-02

## 4 模拟计算结果与分析

为了验证前述地球重力场低阶带谐系数交叠点法计算模型的正确性,进行了模拟计算。模拟方案如表3所示。

表3 模拟方案

Tab. 3 Simulation scheme

项目	内容	说明
数值标准	IERS 2003	包括坐标转换,时间系统转换等
数值积分器	R-K 7(8)单步积分器	RK积分器作为起步积分器
	11阶多步积分器	
参考重力场模型	EGM 2008	<a href="http://earth-info.nga.mil/">http://earth-info.nga.mil/</a>
TLE文件	leoTLE_2008.001.001_txt	<a href="http://www.cosmic.ucar.edu/">http://www.cosmic.ucar.edu/</a>
	leoTLE_2008.001.002_txt	
	leoTLE_2008.001.003_txt	
	leoTLE_2008.001.004_txt	
	leoTLE_2008.001.005_txt	
	leoTLE_2008.001.006_txt	

该方案以EGM2008<sup>[17-18]</sup>为参考模型,轨道初始文件为2008.001的COSMIC第1-6号卫星TLE(two-line element)文件<sup>[19-20]</sup>。轨道生成采用RK7(8)单步积分器起步,Cowell多步积分器进

行精密轨道积分,积分间隔为 1 s,输出数据的步长为 60 s。依次生成 6 颗 COSMIC 卫星第 2008.001 和 2008.031 的模拟轨道。其中 2008.001 轨道的力模型采用 EGM2008。2008.031 轨道的力模型采用基于 EGM2008 的模拟时变模型,  $C_2^0$  和  $C_3^0$  的系数分别加上了  $1 \times 10^{-12}$  和  $1 \times 10^{-15}$  的模拟时变量。模拟中所使用的有关坐标变换及相关数值标准均遵循国际地球自转服务提供的 IERS 2003 标准<sup>[21]</sup>。

表 4 低阶带谐系数 ( $C_2^0$  和  $C_3^0$ ) 模拟计算结果

Tab.4 Simulation results of low degree and order zonal harmonic coefficients  $C_2^0$  and  $C_3^0$

带谐系数	模拟时变量	计算值
$C_2^0$	$1 \times 10^{-12}$	$0.998\ 97 \times 10^{-12}$
$C_3^0$	$1 \times 10^{-15}$	$1.103\ 87 \times 10^{-15}$

采用本文第 2 节的模型处理了由高精度数值积分器生成的 1 个日对(2008.001 和 2008.031)6 颗 COSMIC 卫星的模拟轨道数据,得出的计算值与模拟时变量的比较如表 4 所示。可以看出,本文所给出的计算模型本身的误差很小。

### 5 结 语

利用 LEO 星群数据反演地球重力场低阶带谐项随时间变化的交叠点法需要数据的有效全球均匀覆盖。通过对 COSMIC 星座的分析,目前 COSMIC 星座在全球覆盖方面还存在空白区,而其定轨精度也不足以反应较高空间分辨率的地球重力场时变信号,若能在 COSMIC Follow-on 中进行改进,将定轨精度提高到与 GRACE 类似的厘米量级,将可以使用交叠点法恢复较高分辨率的地球时变重力场。进一步联合其他搭载了星载 GPS 接收机的 LEO 卫星或星座,且精密定轨精度在 1 cm 量级,将可弥补 COSMIC 交叠点分布和轨道精度方面的不足。LEO 星群获取的时变重力场信号将可作为 GRACE 时变观测资料的补充,甚至可作为可能出现的 GRACE 和 GRACE Follow-on 数据间断的替代,为地球科学领域提供连续的地球重力场时变信息。高精度数值积分模拟 COSMIC 卫星轨道的计算结果表明,本文给出的利用交叠点法反演重力场低阶带谐系数随时间变换的数学模型是正确的。

致 谢:宁津生院士是我国著名大地测量学家,为国家测绘事业发展和人才培养作出了重要贡献。

值此宁津生院士 80 华诞之际,特撰写此文以表达对他的崇高敬意,衷心感谢他对笔者 10 多年的培养。

### 参考文献:

- [1] ADAM David. Gravity Measurement: Amazing Grace [J]. Nature, 2002, 416(6876):10-11.
- [2] NING Jinsheng. Following the Developments of the World, Devoting to the Study on the Earth Gravity Field [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2001, 26(6):471-474. (宁津生. 跟踪世界发展动态 致力地球重力场研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2001, 26(6):471-474.)
- [3] CHEN Junyong, WEN Hanjiang, CHENG Pengfei. On the Development of Geodesy in China [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2001, 26(6): 475-428. (陈俊勇,文汉江,程鹏飞. 中国大地测量学发展的若干问题[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2001, 26(6):475-482.)
- [4] CHAO B F, PAVLIS E C, HWANG C H, et al. COSMIC: Geodetic Applications in Improving Earth's Gravity Model [J]. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 2000,11(1):365-378.
- [5] XU Xiaohua, LUO Jia, SHI Chuang. Comparison of COSMIC Radio Occultation Refractivity Profiles with Radiosonde Measurements [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2009, 26(6): 1137-1145.
- [6] XU Xiaohua, LUO Jia, ZHANG Keifei. An Analysis of the Structure and Variation of the Tropopause over China with GPS Radio Occultation Data [J]. Journal of Navigation, 2011, 64:103 - 111.
- [7] HWANG C. Gravity Recovery Using COSMIC GPS Data: Application of Orbital Perturbation Theory [J]. Journal of Geodesy, 2001, 75:117-136.
- [8] HWANG C, HWANG L. Satellite Orbit Error due to Geopotential Model Error Using Perturbation Theory: Applications to ROCSAT-2 and COSMIC Missions [J]. Computers & Geosciences, 2002, 28: 357-367.
- [9] HWANG C, LIN T J, TSENG T P, et al. Modeling Orbit Dynamics of FORMOSAT-3/COSMIC Satellites for Recovery of Temporal Gravity Variations [J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 2008, 46(11): 3412-3423.
- [10] LIN T J, HWANG C, TSENG T P, et al. Low-degree Gravity Change from GPS Data of COSMIC and GRACE Satellite Missions [J]. Journal of Geodynamics, 2012, 53:34-42.
- [11] JEKELI C H. The Determination of Gravitational Potential Differences from Satellite-to-satellite Tracking [J]. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 1999, 75: 85-101.

- [12] HUANG Motao, GUAN Zheng, ZHAI Guojun, et al. The Self-calibrating Adjustment of Marine Gravity Survey Network [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1999, 28(2):162-171. (黄谟涛, 管铮, 翟国君, 等. 海洋重力测量网自检校平差[J]. *测绘学报*, 1999, 28(2): 162-171.)
- [13] BAO Jingyang, CHAO Dingbo, LI Jiancheng. Tidal Harmonic Analysis near Crossovers of TOPEX/ POSEIDON Ground Track in South China Sea [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2000, 29(1):17-23. (暴景阳, 晁定波, 李建成. 南中国海 TOPEX/ POSEIDON 轨迹交叉点测高数据的潮汐调和与分析[J]. *测绘学报*, 2000, 29(1): 17-23.)
- [14] LI Jiancheng, NING Jinsheng, CHEN Junyong, et al. Determination of Gravity Anomalies over the South China Sea by Combination of TOPEX/ Poseidon, ERS2 and Geosat Altimeter Data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2001, 30(3):197-202. (李建成, 宁津生, 陈俊勇, 等. 联合 TOPEX/ Poseidon, ERS2 和 Geosat 卫星测高资料确定中国近海重力异常[J]. *测绘学报*, 2001, 30(3):197-202.)
- [15] LUO Jia, NING Jinsheng. Analysis of Time-variable Gravity Field Exploring Performance with LEO Cluster [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(6): 636-638. (罗佳, 宁津生. LEO 星群探测地球重力场的性能分析[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2010, 35(6):636-638.)
- [16] HEISKANEN W A, MORITZ H. *Physical Geodesy*[M]. San Francisco: W H Freeman and Company, 1967.
- [17] NGA. Earth Gravity Model(EGM)2008[EB/OL]. [2010-09-20]. <http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/>.
- [18] PAVLIS N K, HOLMES S A, KENYON S C, et al. An Earth Gravitational Model to Degree2160: EGM2008 [R]. Vienna:EGU General Assembly,2008.
- [19] NORAD. NORAD Two-line Element Set Format[EB/OL]. [2004-08-30]. <http://celestrak.com/NORAD/documentation/tle-fmt.asp>.
- [20] UCAR. COSMIC Homepage[EB/OL]. [2010-09-26]. <http://www.cosmic.ucar.edu/>.
- [21] DENNIS D M, GERARD P. IERS Conventions (2003) [M]. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts fur Kartographie und Geodasie, 2004.

(责任编辑:宋启凡)

收稿日期:2012-05-20

修回日期:2012-07-19

第一作者简介:罗佳(1975—),男,博士,副教授,主要从事地球重力场和 GNSS 气象学的研究。

First author: LUO Jia (1975—), male, PhD, associate professor, majors in earth gravity field and GNSS.

E-mail: jluo@sgg.whu.edu.cn

(上接第 695 页)

- [16] LIU J, CANNON M E, ALVES P, et al. A Performance Comparison of Single and Dual Frequency GPS Ambiguity Resolution Strategies [J]. *GPS Solutions*, 2003, 7: 87-100.
- [17] TEUNISSEN P J G. The Geometry-free GPS Ambiguity Search Space with a Weighted Ionosphere [J]. *Journal of Geodesy*, 1997, 71(6):370-383.
- [18] LIU X, TIBERIUS C C J M, DE JONG K. Modelling of Differential Single Difference Receiver Clock Bias for Precise Positioning [J]. *GPS Solutions*, 2004, 7(4):209-221.
- [19] ZHANG Baocheng, OU Jiekun, YUAN Yunbin, et al. Calibration of Slant Total Electron Content and Satellite-receiver's Differential Code Biases with Uncombined Precise Point Positioning Technique [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, 40(4): 447-453. (张宝成, 欧吉坤, 袁运斌, 等. 利用非组合精密单点定位技术确定斜向电离层总电子含量和站星差分码偏差[J]. *测绘学报*, 2011, 40(4): 447-453.)
- [20] AXELRAD P, COMP C J, MACDORAN P F. SNR-based Multipath Error Correction for GPS Differential Phase [J]. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, 1996, 32(2): 650-660.
- [21] XIA Linyuan. Theory and Numerical Results of Multipath Effects in GPS Monitoring[D]. Wuhan: Wuhan University, 2001. (夏林元. GPS 观测值中的多路径效应理论及数值结果 [D]. 武汉:武汉大学, 2001.)
- [22] WU Yuhang, CHEN Xiuwang, WU Caicong. Mitigation of Multipath Effect Using SNR Values [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(8): 842-845. (吴雨航, 陈秀万, 吴才聪. 利用信噪比削弱多路径误差的方法研究[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2008, 33(8):842-845.)

(责任编辑:张燕燕)

收稿日期:2012-04-20

修回日期:2012-08-07

第一作者简介:程鹏飞(1964—),男,博士,研究员,研究方向为 GNSS 理论研究与应用开发。

First author: CHENG Pengfei (1964—), male, PhD, research fellow, majors in GNSS theory research and application.

E-mail: chengpf@casm.ac.cn